

高次視覚野における運動視神経網のモデル化に関する研究

| | |
|--------|---|
| 著者 | 岡本 浩明 |
| 号 | 50 |
| 学位授与番号 | 3545 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/37213 |

| | |
|---------------|--|
| 氏 名 | おか もと ひろ あき 岡 本 浩 明 |
| 授 与 学 位 | 博士 (工学) |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平成18年3月24日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻 |
| 学 位 論 文 題 目 | 高次視覚野における運動視神経網のモデル化に関する研究 |
| 指 導 教 員 | 東北大学教授 矢野 雅文 |
| 論 文 審 査 委 員 | 主査 東北大学教授 矢野 雅文 東北大学教授 阿曾 弘具 東北大学教授 塩入 諭 |

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

視覚の機能は空間視と形態視に大別される。空間視は「物が何処にあるか」を知る機能で、形態視は「物が何であるか」を知る機能である。特に、空間視の基本である動きを検出する機能は、あらゆる生物にとって普遍的で必須の機能と考えられる。本研究は、この運動視を対象とし、高次視覚野の神経網モデルの提案とその実験的な検証を行うことを目的とする。このようなモデル化を通して生物の巧妙な視覚機能に倣うことにより、工学的にも大きなブレークスルーを期待している。

本論文は以下の内容で構成されている。第2章では、局所運動を検出する MT 野(middle temporal area)の神経網モデルにおいて、2種類の双峰的運動方向選択性(directional selectivity, DS)を明らかにし、その予測応答を二ホンザル MT 野における電気生理実験で検証した結果を示す。第3章では、MT 野で検出される局所運動を統合して、MST 野(medial superior temporal area)において平面の空間パラメータ (平面方位と到達時間) 検出を行う神経網モデルを提案する。その細胞応答をシミュレーションにより明らかにし、その実験的検証法について記す。第4章では、平面の到達時間を検出するアルゴリズムを拡張して、MST 野で平面の方位と最短距離を検出する神経網モデルについて説明する。第5章では、運動視モデルの更なる展開と工学応用について述べる。

第2章 局所運動検出モデルとその実験的検証

運動視の中核である MT 野で局所運動を検出するモデルを提案しており、網膜画像を外側膝状体(LGN)で時間遅れあり・無しの経路に分岐した後に、ハフ変換・時空間相関・逆ハフ変換の処理を

行い、MT 野の運動方向選択性(DS)複雑細胞で1次元速度を検出し、それらの1次元速度を統合することにより、運動検出細胞で2次元速度を検出することを示した。DS 複雑細胞はコンポーネント細胞、運動検出細胞はパターン細胞にそれぞれ対応する。このモデルに基づいて、MT 野の2種類の細胞でそれぞれ異なったタイプの双峰的な DS 性が生じることを予測した。DS 複雑細胞ではスポット刺激を高速に動かした時に双峰的 DS 性が生じ、運動検出細胞ではバー刺激を低速に動かした時に双峰的 DS 性が生じる。それ以外の刺激呈示条件では、これまでに考えられている通りの単峰的な DS 性となる。局所運動検出モデルの細胞応答シミュレーションによって、単峰的 DS 性の時の最適方向を基準にして、予測した条件下で最適方向が対称的に2方向に分かれて行き双峰性を示す様子を明らかにした。

このモデルの予測応答を検証するために、ニホンザルの MT 野を対象に電気生理実験を行い、微小電極を用いて単一細胞の活動を計測した。まず、計算機で生成したクロス図形を視覚刺激として用い、その反応特性によって MT 野の細胞を DS 複雑細胞と運動検出細胞のどちらであるか分類した。次に、スポットとバーを視覚刺激として用い、速度を多段階に変化させながら細胞応答を記録して DS 性チューニングカーブを調べた。その結果、全計測細胞 35 個 (DS 複雑細胞 15 個、運動検出細胞 14 個) のうち、DS 複雑細胞 6 個、運動検出細胞 4 個において予測通りの双峰的 DS 性を記録することに成功し、モデルの神経生理的妥当性を検証することができた。

第3章 局所運動から平面検出を行う MST 野神経網モデル

本章では、MT 野で検出する局所運動 (オブティカルフロー) を統合して、MST 野で空間認識を行う神経網のモデルを提案した。MST 野は MT 野からの直接投射を受けており、広視野の運動視の中枢と考えられている。この MST 野で、周囲の環境を構成する平面の「方位」とその平面までの「到達時間 (time-to-contact)」を検出することで環境を空間的に認識していると考え、その数理アルゴリズムを「複比変換+極変換」を用いて定式化した。複比変換により平面上の各点のそれぞれの規格化到達時間における眼球上の投影位置を予測し、その予測投影点を極変換することによって平面の方位候補群を球面上の大円として求める。ここで規格化到達時間とは、平面までの到達時間を基準時間 (LGN での遅れ時間) で規格化した値である。平面上の複数の点から得られる大円群が1点で交差する時、その交差点が平面の方位と規格化到達時間を示す。

この数理アルゴリズムに基づき、局所運動検出モデルと組み合わせて、網膜から MST 野までの全

神経網のモデル化を行った。MST 野の細胞が、上述の平面方位（2次元）と規格化到達時間を座標軸とした3次元配列を取って MST 細胞コラムを構成していると仮定し、MT 野の運動検出細胞と MST 細胞コラムの間の神経網を「複比変換と極変換」のアルゴリズムに基いてモデル化した。この全神経網モデルを計算機上に構築して大規模な細胞応答シミュレーションを行った。その結果、ランダムドット・直線図形・実画像などの多様な網膜入力から、その平面の方位と規格化到達時間を正しく検出できる様子を確認した。また、連続的な網膜入力による時系列シミュレーションを行い、単一 MST 細胞の予測応答を調べた。ニホンザル MST 野における予備的な検証実験により、平面の到達時間に対して予測応答と同じような選択的応答を示す MST 細胞を観察することができた。

第4章 平面までの最短距離を検出する MST 野神経網モデル

本章では、前章で述べた平面までの到達時間を検出するアルゴリズムを拡張して、平面までの最短距離を検出する神経網のモデル化を行った。平面の方位と規格化最短距離を検出する数値アルゴリズムを「小円変換」に基いて定式化した。本アルゴリズムでは、各規格化最短距離において平面上の各点を球面上の小円に変換する。平面上の複数の点から得られる小円群が1点で交差する時、その交差点が平面の方位と規格化最短距離を示す。

MST 野において、平面方位と規格化最短距離にそれぞれ選択的な MST 細胞がコラム構造を成していると考え、数値アルゴリズムに基づいて MST 野の神経網のモデル化を行った。このモデル神経網を計算機上に構築して細胞応答シミュレーションを行い、様々な網膜入力から平面パラメータ（方位と規格化最短距離）を正しく検出できることを確認した。

この最短距離検出のモデルにおいて、視軸と直交した運動方向を考え、規格化最短距離を両眼の間隔で与えた場合、両眼視差から平面の方位と奥行きを検出する立体視モデルとみなすことができる。この場合のモデル神経網を構築してシミュレーションを行い、ステレオ画像から平面パラメータを検出できることを示した。

第5章 運動視モデルの展開と工学的応用

本章では、運動視神経網モデルの展開とその工学的応用について述べた。

まず、運動視のモデル化に関してニューロインフォマティクスの視点からも研究を進めた。脳の高次機能を解明するためには数値モデルと実験データの密接な連携が重要になると考えられ、ニュー

ーロインフォーマティクスが近年提唱されている。本研究では、運動視モデルに基く MT 野・MST 野細胞のシミュレーション応答を実際の細胞活動と具体的に比較することが可能であり、その先駆的な研究例と言える。なお、本モデルの情報共有化を目的として、ウェブコンテンツの開発を行ってその成果を公開した。

次に、形態視モデルへの展開として、コラム間結合に基づく輪郭直線検出のモデルを提案した。第一次視覚野 (V1 野) の NDS 単純細胞はハフ変換により受容野内の線分を検出する機能を果たしており、形態視の起点ともなっている。物体輪郭を検出するためには、複数の受容野にわたる線分群を統合する機能が必要であり、コラム間の水平結合に基いてその神経網のモデル化を行った。また、このコラム間の結線様式は、MT 細胞モデルの拡張においても基本となることを示した。

更に、工学応用の例として、V1 野の NDS 単純細胞における局所ハフ変換機能の LSI 化について検討し、LPGA による試作を行って高速動作を実証した。この LSI の出力結果を利用して、上述のコラム間結合モデルに基く輪郭直線の検出についてシミュレーションを行い、局所線分を統合して輪郭直線を検出できることを確認した。

第 6 章 結論

本研究では、運動視の中枢である高次視覚野 (MT 野・MST 野) において局所運動、および、平面の空間パラメータ (平面方位と規格化到達時間・規格化最短距離) を検出する数理アルゴリズムを明らかにし、それに基づいた神経網のモデル化を行った。モデル神経網の計算機シミュレーションにより、様々な網膜入力に対して各細胞が正しく反応して、局所運動あるいは平面の空間パラメータを検出できることを確認した。また、シミュレーションにより MT 細胞および MST 細胞の予測応答を示すと同時に、ニホンザルを用いて電気生理実験による検証を行い、モデルの神経生理的な妥当性を部分的に示唆する結果を得た。

論文審査結果の要旨

人間のような柔軟な視覚機能を持つ人工的なシステムを実現することは、現代の情報処理システムの大きな課題の一つである。そのためには何をどの様に計算するのかという計算論、計算に用いられる情報の表現とアルゴリズムを明らかにし、それに基づくハードウェアを如何に作るのかという課題を解決しなければならない。視覚機能は運動視と形態視に分けられるが、著者はその二つの機能のうち、運動視の空間認識機能に着目し、運動視神経網のモデル構築とシミュレーションによる解析、このモデルの妥当性を検証するための神経生理学実験、およびその工学的応用の検討を行った。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、運動視の中枢であるMT野の運動方向選択性(DS)複雑細胞で1次元速度を検出し、これらを統合することにより、運動検出細胞で2次元速度を決定するモデルを提案している。このモデルによればMT野の2種類の細胞がそれぞれ双峰的DS性を示すことが予測される。ニホンザルを用いて検証生理実験を行い予測通りのことが起きていることを実証し、このモデルが神経生理的に妥当であることを示した。これは有用な成果である。

第3章では、MST野の神経網が広視野の局所運動を統合することで空間認識を行うモデルを提案している。3次元空間に存在する平面の「方位」とその平面までの「到達時間」を検出する数理アルゴリズムを「複比変換+極変換」を用いて定式化し、網膜からMST野までの全神経網のモデル化に成功している。平面の到達時間に選択的応答を示すMST細胞が実験的にも確認されており、このモデルの妥当性・有効性が示されている。

第4章では、「平面までの到達時間」を検出するアルゴリズムを拡張して「平面までの最短距離」を検出するMST野神経網のモデルを提案し、シミュレーションにより平面方位と最短距離を正しく検出できることを実証している。また、最短距離を検出する運動視モデルが、両眼視差から平面の奥行きを検出する立体視モデルに拡張できることを示している。これは実用上有用な知見である。

第5章では、運動視神経網モデルの展開と工学応用について論じている。工学応用のため、第一次視覚野のNDS単純細胞における局所ハフ変換機能のLSI化について検討し、FPGAによる試作を行って高速動作を実証している。これは実用上重要な結果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、運動視における空間認識の計算論とアルゴリズムを提案し、計算機シミュレーションと生理実験により、その妥当性・有効性を実証したもので、生体システム工学、情報通信システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。